

# 近赤外分光法 (NIRS) を用いた図形学習時の 脳活動についての研究

— 図形の念頭操作と実物操作時の脳活動の変化 —

黒田 恭史

## 1. 研究目的

これまで図形教育においては、学習時の子どもの理解を促進するために、様々な教具が活用されてきた。例えば、平面図形の運動（平行・対称・回転）の学習では、合同な図形を見つけ出すために、図形の輪郭が記された透明のシート（以下、透明シートと略記）を教具として用いてきた。そこでは、教具を用いた具体的な操作（実物操作）を繰り返すことで、やがては頭の中だけで合同な図形を見つけ出すと言った念頭操作への移行が期待された。

実際、実物操作と念頭操作で合同な図形を見つけ出すといった尾迫ら（2002）の実験によれば、両者を比較した場合、小学校1・2年生の段階にあっては、いずれも実物操作の方が正答率が高く、とりわけ回転運動、対称運動と回転運動を組み合わせた図形にその傾向が顕著であるとされている。これは、透明シートによる実物操作が合同な図形を確認する際に有効な手だてとなることを示しているといえるであろう。

その一方で、たとえ実物操作による学習活動を繰り返したとしても、念頭操作への移行が極めて困難な子どもたちも少数ながら存在する。むしろ、実物操作と念頭操作では、学習者の着目点が異なる可能性もある。実物操作では透明シートに描かれた図形の形を合わせることに注目してしまい、本来の目的である運動を意識しないのではないかといった問題が指摘されるのである。実物操作が念頭操作の前段階として重要な役割を担っているかどうかは、子どもの学習プロセスの詳細な検討を必要とする問題であるといえよう。

ところで、fMRIやMEGに代表される測定装置の開発により、この間、脳

機能の画像化が飛躍的にすすめられている。また、近年開発されたNIRS (near-infrared spectroscopy) 測定装置は、ヘモグロビン (Hb) の光吸収性に着目し、大脳皮質の血液量の変化をヘモグロビン変化を媒介として測定する装置であり、fMRIやMEGよりも身体的拘束性が低く、測定時における被験者の作業を可能にするという点に特徴を持っている。脳の各部位の詳細な測定精度 (空間分解能: 約2.0~3.5cm) は高くないが、継続的な脳活動の分析 (時間分解能: 500msec~1000msec) は極めて高い。こうした機器の登場により、学習活動時における脳内の変化を可視化することが可能となりつつある。

本稿では、NIRS測定装置を用い、図形の運動の学習時における学習者の脳内の変化の様相について明らかにすることを目的とする。試行回数、及び透明シートの活用の有無等を変数として用い、その相違を明らかにする。

## 2. 実験方法

### (1) 実験環境

NIRS測定装置には多チャンネル型と1チャンネル型があり、多チャンネル型では頭部の複数の部位を、1チャンネル型では一ヶ所のみを測定することが可能である。本実験では、脳活動の様相の各部位の詳細な差異ではなく全般的な活性化の状況の測定を主とするため、1チャンネルの装置を採用する (図1、図2)。

また、本装置は測定中の被験者の作業を可能とするものであるが、頭部を動かすと装置と頭部表皮との接触面がずれる可能性もあり、正確なデータの収集に支障を来すおそれがある。そこで、以下のような対策を行った。

- ①作業過程における動きを最小限にするため、被験者の視線を考慮して、椅子、机の配置、高さ等を設定する。
- ②頭部の固定のために、被験者の顎と前頭葉上部に、固定台を設置する (図3)。
- ③被験者の頭部に装着するNIRS装置は、ずれないように伸縮性のバンドで固定する (図4)。
- ④被験者が課題に集中できるよう個室で実施する。被験者の前方は白壁とし、音声等のノイズについても遮断する。

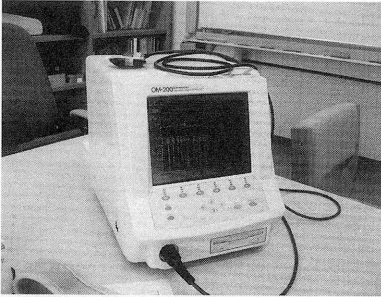


図 1：1 チャンネル型NIRS測定装置

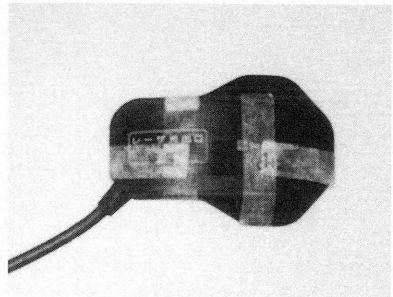


図 2：頭部との接触装置



図 3：机、椅子、固定台の設置



図 4：機器を装着した状態

## (2) 実験概要

- 1) 実験日程：2002年10月7日 13：00～13：30
- 2) 被 験 者：1 名 (22歳、女性、大学生、右利き)
- 3) 測定部位：右前頭葉 (目視と接触により右前頭葉の最突出部位を同定)  
最突出部位を挟むようにして装着 (プローブ間隔：4 cm)  
図形分野に関連する課題のため、反応が大きいと予想される  
右前頭葉を測定部位とする。
- 4) 測定装置：1 チャンネル型NIRS (OM-200 島津製作所製)

## (3) 課 題

平面図形における運動 (平行・対称・回転) の学習過程における脳活動の変化の様相を測定するという目的のもと、大学生を対象として課題設定を行った。従って、用いた図形は複雑なもので、一見しただけでは合同な図形を判

別することが困難なものとした。

課題は、透明シート有型（5枚）と透明シート無型（5枚）があり、それぞれの用紙に複雑な模様の描かれた一辺が3.2cmの正方形が格子状に9枚置かれており、中心部の正方形の模様と合同な図形全てを回答させる（図5：矢印で示された図形が合同な図形）。シート有型では、中心部の正方形の模様と合同な模様が赤色で描かれた透明シートを被験者に与え、シート無型は目視のみによって合同な図形を回答させる。シート有型（5枚）において中心部の正方形の図形は同一のものを採用する。従って、透明シートは1種類のみを使用する。シート無型においては、シート有型と異なる正方形を中心部に置くが、シート無型（5枚）の試行内においては同一の正方形を使用する（図6）。尚、いずれの場合も問題用紙の移動は不可とした。

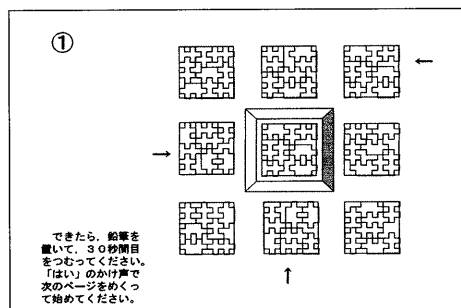


図5：回答用紙（A4サイズ、横長置）

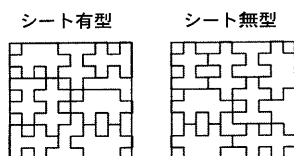


図6：中心の図形

また、合同となる図形の運動には8種類があり、本実験ではこの8種類を満遍なく使用することで、回答用紙間の難易に差が出じないようにした（図7：平行運動1種類、対称運動2種類〔左右反転、上下反転〕、回転運動3種類〔90°回転、180°回転、270°回転〕、対称運動×回転運動2種類〔左右反転×90°回転、左右反転×270°回転〕）。

さらに、合同な図形の個数は、回答用紙毎に異なるようにした（表1）。というのも、個数を一定にすると、該当個数分を選択した段階でその他の図形の考察を行わなくなるため、考察個数によって回答時間に差が生じてしまうためである。被験者には、「回答用紙毎に合同な図形の個数が異なるので全ての図形を確かめるようにしてください。」との指示を口頭で行った。

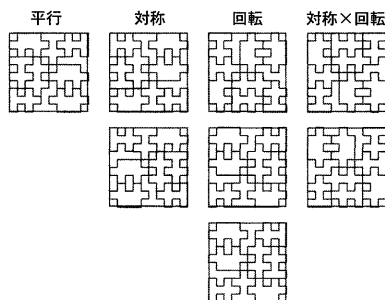


図 7：運動の種類（8 種類）

	シート有型	シート無型
第 1 試行	3	3
第 2 試行	2	2
第 3 試行	4	4
第 4 試行	1	1
第 5 試行	3	3

表 1：各試行における合同な図形（正答）の個数

#### （4）試 行

- ①プレテスト実施（簡単な図形を用い、問題回答方法及び透明シートの使用法を説明）
- ②シート有型：30秒間閉眼・安静状態の後、「はい」の合図とともに開始する。  
1 枚目終了時点で被験者は鉛筆を置く。30秒間閉眼・安静状態で休憩。「はい」の合図で 2 枚目開始。以下、5 枚目まで同様。
- ③シート無型：シート有型終了後、1 分間閉眼・安静状態で休憩。その後、シート無型の回答方法説明。30秒間閉眼・安静状態で休憩の後、「はい」の合図とともにシート無型を開始し、1 枚目終了時点で被験者は鉛筆を置く。その後、30秒間閉眼・安静状態で休憩。「はい」の合図で 2 枚目開始。以下、5 枚目まで同様。
- ④終了。

### 3. 実験結果

#### （1）試行時間

シート有型、シート無型の試行時間は表 2 の通りであり、その過程を時間軸を用いて示すと、図 8 のようになる。

	シート有型	シート無型	平均時間
第 1 試行	118秒	131秒	124.5秒
第 2 試行	82秒	112秒	97.0秒
第 3 試行	89秒	73秒	81.0秒
第 4 試行	52秒	44秒	48.0秒
第 5 試行	52秒	59秒	55.5秒
総 時 間	393秒	419秒	812秒
平均時間	78.6秒	83.8秒	81.2秒

表 2：試行時間

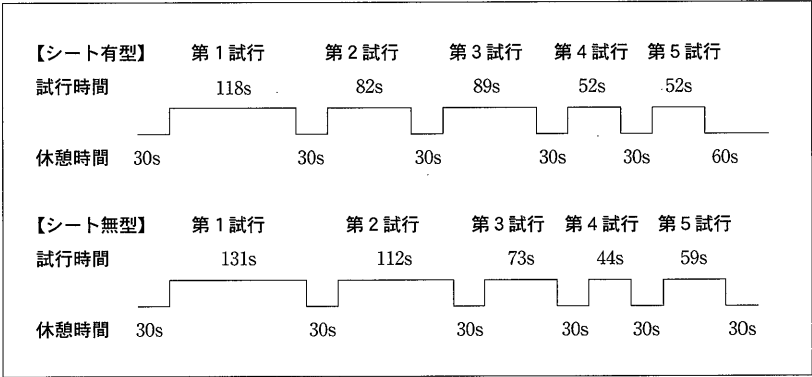


図 8：試行過程

(2) 正 誤

誤答は10回の試行の中で 1 図形のみであった。誤答の詳細は、シート無型第 2 試行において、合同図形を合同図形でないと回答したというものである。

(3) 測定値

脳内の血流量の変化の詳細を、酸素化ヘモグロビン (oxyHb)、脱酸素化ヘモグロビン (deoxyHb)、総ヘモグロビン (totalHb) の三項目において測定した。oxyHbは酸素を多く有した血液、脱酸素化ヘモグロビンは酸素を放出した血液、totalHbは該当箇所の総血液の量である。通常、脳を活性化させるということは、脳内に多くの血液を流すこと、つまり血流量の増加と考えることができ、totalHbとoxyHbの増加が観測されることとなる。その後、該当部位での活動が活発化すると、酸素を放出したdeoxyHbの増加が見られることになる。従って、脳の活性化の状況は、試行前半段階でのtotalHbとoxyHbの変化（増加）と、試行後半段階のdeoxyHbの変化（増加）に着目する必要がある。

測定値はベースライン補正を行わずそのまま算出し、各試行毎にグラフ化した（グラフ 1～10；後載）。各試行毎の三種のヘモグロビンの時間経過における変化量を直接比較するためである。各グラフの横軸は時間（秒）、縦軸はHbの変化量（A.U.）を示しており、oxyHb、deoxyHb、totalHbの変化の状態をそれぞれグラフ化した。

## (4) 各試行におけるHbの平均値

シート有型とシート無型の各試行におけるヘモグロビン (oxyHb、deoxyHb、totalHb) の平均値と、両者の差 (シート無型－シート有型) を表にしたものが、表3である。

型 試行	シート有型			シート無型			差(シート無－シート有)		
	oxyHb	deoxyHb	totalHb	oxyHb	deoxyHb	totalHb	oxyHb	deoxyHb	totalHb
第1	0.0762	-0.0173	0.0589	0.0870	0.0004	0.0874	0.0108	0.0177	0.0285
第2	0.0680	-0.0241	0.0438	0.0919	-0.0133	0.0785	0.0239	0.0108	0.0347
第3	0.0552	-0.0223	0.0329	0.0960	0.0270	0.0986	0.0408	0.0493	0.0657
第4	0.0583	-0.0248	0.0334	0.1132	-0.0033	0.1099	0.0549	0.0215	0.0765
第5	0.0587	-0.0352	0.0236	0.1045	0.0159	0.1204	0.0458	0.0511	0.0968
平均	0.0633	-0.0247	0.0385	0.0985	0.0053	0.0990	0.0352	0.0300	0.0605

表3：各試行におけるヘモグロビン (oxyHb, deoxyHb, totalHb) の平均値

## (5) 被験者の内省

実験終了後、被験者に対して実験過程で想起した事柄の記述を指示した。以下、その内から特徴的なものを取り上げ列記する。

## 【シート有型において】

- ・初めは、図形1つずつ形を見て同一のものを探すより、透明シート自体をあてはめて線の重なりを見つけようとする思考がよく働いた。
- ・次第に透明シートのある部分の形に着目して探すようになった。
- ・第3試行以降から、○×の判断に自信を持ちはじめた。
- ・第4試行以降は、透明シートを合わせなくても判断できるようになった。

## 【シート無型において】

- ・第2試行から、着目する形が決まった。
- ・第3試行から、着目した図形のないものはすべて×をつけた。
- ・調べている図形の中に先の着目した図形があった場合、次に同一と判断する基準の図形を設定して、比較を行っていった。
- ・第4試行から、図自体を頭の中で回転させることが出来始めた（それまでは各部分を何度も比較しながら確かめていた）。

### 【全体において】

- ・作業に習熟した段階では、シート無型の方が選びやすかった。むしろ、透明シートが邪魔に感じた。
- ・シート有型もシート無型も、焦点をあてる図形の形・向き・位置を決定すると、一瞬で同一かどうかの判断が出来るようになった。

## 4. 考 察

上記の結果をもとに、項目毎に考察を行う。

### (1) 試行時間について

シート有型では、試行数が増加するにつれ、各試行時間は総じて減少している。また、第1試行と第2試行、第3試行と第4試行の間に時間差が認められる。第1試行と第5試行を比較すると、試行時間は半分以下になっている。シート無型においても、試行数の増加に伴い、各試行時間は総じて減少している。第2試行と第3試行、第3試行と第4試行の間に時間差が認められ、シート有型同様、試行時間は第1と第5で半分以下となっている。また、シート有型とシート無型を比較すると、平均試行時間数はほぼ同じであり、試行回数と試行時間の関係も似通ったものとなっている。また、双方とも正答図形数が1図形のための第4試行において最短時間を記録しており、被験者の内省をも鑑みれば、正答図形数が少ない試行の方が回答時間が短くなることを示しているといえる。第3試行、第4試行ではシート有型よりもシート無型の方が試行時間が短い。

これらのことから、透明シートの有無によって試行時間が大幅に変化するということはなく、むしろ、試行時間という外的判断基準からは、両者の試行はほぼ同じように行われたと結論付けられることとなる。

### (2) 正誤について

10試行の中で誤答は1図形のみであったことから、被験者は課題の意味を正確に理解し、試行が適切に行われたといえる。



### (3) 各試行における測定値について

#### 【シート有型】

- ・ グラフ 1～5 を通じて、全般的に上側から oxyHb、totalHb、deoxyHb の順に並んでいる。
- ・ グラフ 2～4 では、各グラフ内の oxyHb の量が後半部分にいくにつれ減少している。
- ・ グラフ 1、2、5 では、各グラフ内の deoxyHb の量があまり変化していない。
- ・ グラフ 3 では、oxyHb と deoxyHb の双方が相対する形で上下に数回波打つように変化している。
- ・ グラフ 4 においてはグラフの後半部分に deoxyHb の増加が見られる。

#### 【シート無型】

- ・ グラフ 6～10 を通じて、全般的に oxyHb と totalHb が高い位置において近い関係を持続しており、deoxyHb が下側に離れて位置している。
- ・ グラフ 9 を除いて、oxyHb は横ばいもしくは増加傾向にある。
- ・ グラフ 6 では、oxyHb と deoxyHb の双方が相対する形で上下に数回波打つように変化している。
- ・ グラフ 9、10 においてはグラフの後半部分に deoxyHb の増加が見られる。

#### 【両者を比較】

- ・ シート有型とシート無型の第 1 試行（グラフ 1 とグラフ 6）は、同様な動きを見せる。
- ・ oxyHb、totalHb はシート無型グラフの方が総じて高い。
- ・ シート有型とシート無型の第 4 試行（グラフ 4 とグラフ 9）は、同様な動きを見せる。

### (4) 各試行における Hb の平均値について

- ・ シート有型では、試行を繰り返すにつれて oxyHb、deoxyHb、totalHb の平均値がそれぞれ減少傾向となる。
- ・ シート無型では、試行を繰り返すにつれて oxyHb、deoxyHb、totalHb の平均値がそれぞれ増加傾向となる。
- ・ シート有型の平均値では  $\text{oxyHb} > \text{totalHb} > \text{deoxyHb}$  となり、シート無型

の平均値ではtotalHb > oxyHb > deoxyHbとなる。

- ・シート有型とシート無型の平均を比較すると、oxyHb、deoxyHb、totalHbともシート無型が高い。とりわけ、試行の前半部（シート有型とシート無型の第1試行）と、後半部（シート有型とシート無型の第5試行）の平均値の差（＝シート無型－シート有型）を比較すると3項目とも後半部の差の方が大きくなっている。

## （5）被験者の内省について

### 【シート有型】

- ・図形と透明シートの線を合わせることに意識が集中し、図形の運動には着目していなかった。
- ・途中の段階から図形の中でのキーとなる部分を考え、それを抛り所に判断するようになった結果、透明シートの活用が減少することとなった。観察者からの観察においても、第4試行からは被験者の透明シートの活用が減少した。

### 【シート無型】

- ・念頭操作の活用にあっても、図形の中でのキーとなる部分を考え、それを抛り所に判断しようとしていた。
- ・第4試行以降は、図形を頭の中のイメージで運動（回転）させて、比較することが可能となった。

## 5. 結 語

NIRS測定装置の使用により、学習過程における脳内の活性化の様相の一部を可視化することが可能となった。図形の実物操作と念頭操作による学習活動を比較した際、脳内の活性化の状態の測定結果から以下のことが明らかになった。

- ①実物操作（シート有型）と念頭操作（シート無型）における試行時間は、施行毎に同じような変化を辿り、正答率にも差は生じなかった。つまり、通常の外的測定方法においては両者間の差異は認められなかった。
- ②その一方で、脳内の活性化の状態（oxyHb、deoxyHb、totalHb）はかなり

異なっており、実物操作では試行を繰り返すにつれてoxyHb、deoxyHb、totalHbが減少傾向にあるのに対して、念頭操作では試行を繰り返すにつれてoxyHb、deoxyHb、totalHbが増加傾向にあり、脳内の活性化が継続的に実施されていたことを示している。

- ③実物操作と念頭操作のいずれにおいても、第1試行は所要時間が最大となっており、グラフにおけるヘモグロビンの分布状況も似通ったものとなっている。
- ④実物操作と念頭操作のいずれにおいても、第4試行以降は被験者の課題に対する解決の方略が明確になり、所要時間の大幅な減少と双方のグラフの分布の近似が見られる。
- ⑤上記③、④より、今回の被験者が課題解決の方略を獲得する段階は、第2、第3試行の段階に相当すると考えられる。この段階での両者の違いは、シート有型が時間経過によるoxyHbの減少を記録しているのに対して、シート無型が増加を示している点である。この相違の原因については、さらなる実験成果をもとに詳細な検討が必要であると考えられるため、今後の課題としたい。

上記の一連の実験から、実物操作と念頭操作が外的観察からでは同様の変化を示しているにも関わらず、脳内での活動においては実物操作が外的作業行為そのものに着目するのに対して、念頭操作が運動の意味や心的な操作に着目するため、その違いが脳内の活性化の相違として出現してきているのではないかと予想される。従って、図形教育において、たとえ念頭操作学習の前段階として実物操作の学習活動を取り入れたとしても、果たして両者が連動した学習カリキュラムと成り得ているのかという点については、再検討の余地も指摘されよう。

脳機能測定の実用への応用についての研究は、まさに始まったばかりではあるが、今後は、これまでの教科教育等での研究成果（教育内容、教育方法、子どもの認識の外的測定等）と脳の生理学的測定とを連携させた新たな「教科教育」のあり方を模索していく必要があると考える。今後の課題として次の点を挙げておく。

(ア)被験者の質的（年齢）、量的（人数）増加。

(イ)従来の教科教育研究を踏まえた関連問題の作成・実験と相互関係につい

での検討

(ウ)脳機能測定から教科教育への応用の可能性の検討。

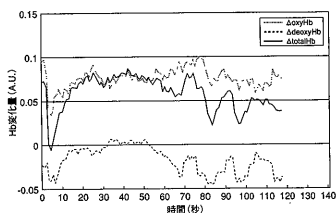
【参考文献】

- 黒田恭史（1989）小学校中学年における図形教育の試み ―パソコンを利用した場合―、大阪教育大学『数学教育研究』19：9-21
- 村田勉・柳田敏雄（2001）視覚的意識のゆらぎの背後にある脳の量子的状態と確立ダイナミクス、日本神経回路学会誌Vol.8／No.4：139-146
- 尾迫瞳美・黒田恭史（2002）小学生の平面の図形教育について ―平行・対称・回転運動に着目して―、第6回数学教育学会大学院生部研究会発表論文集：36-40
- Rita Carter.（1998）MAPPING THE MIND; 養老孟司監修（1999）ビジュアル版 脳と心の地形図 思考・感情・意識の深淵に向かって、原書房、東京
- 田中さやか他5名（2002）NIRSを用いた学習活動時の脳活動計測についての一研究 ―線描画活動の練習に関連した脳活動の変化―、日本教育工学会第18回全国大会発表論文集
- 山口有美・山口晴久（2002）脳波を用いた幾何学的課題解決過程における学習者の生体情報工学的研究、岡山大学教育実践総合センター紀要2：71-79
- Yokochi Kiyoshi.（2002）“Child Development of Drawing Patterns”. MECHM-3：11-16, Kyoto.

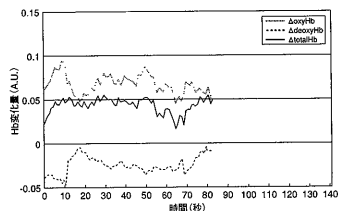
謝 辞：本稿を纏めるにあたっては、通信総合研究所 関西先端研究センター 江田英雄先生、大阪大学人間科学部 前迫孝憲教授に御指導いただいた。また、本実験の被験者として佛教大学教育学部4回生 首藤久実子氏、課題作成時に同4回生 尾迫瞳美氏の助力を得た。ここに感謝の意を表する。

附 記：本稿は、平成14年度佛教大学個人特別研究助成を受けて行った研究成果の一部である。

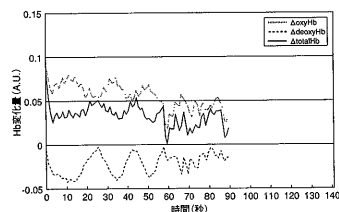
（くろだやすふみ 教育学科）  
（通信総合研究所 研修員）



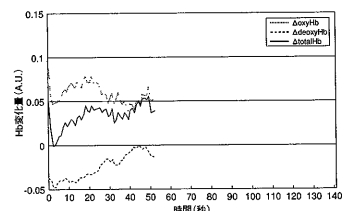
グラフ 1：シート有型 第1試行



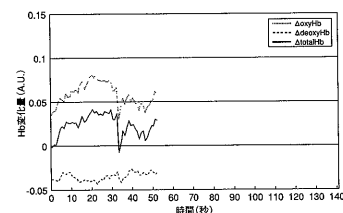
グラフ 2：シート有型 第2試行



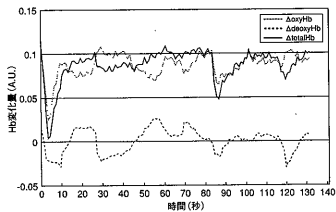
グラフ 3：シート有型 第3試行



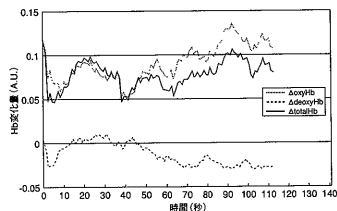
グラフ 4：シート有型 第4試行



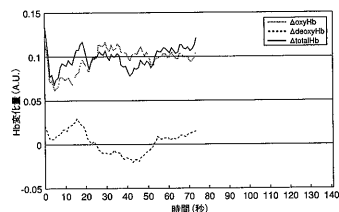
グラフ 5：シート有型 第5試行



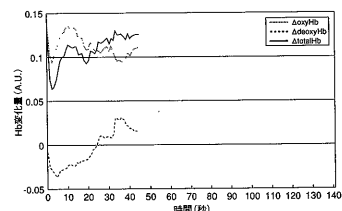
グラフ 6：シート無型 第1試行



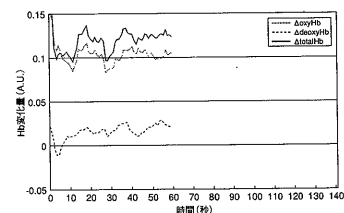
グラフ 7：シート無型 第2試行



グラフ 8：シート無型 第3試行



グラフ 9：シート無型 第4試行



グラフ 10：シート無型 第5試行

